

# RLSA プラズマ応用装置の高性能化技術に関する研究

著者	石橋 清隆
号	51
学位授与番号	3785
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/37453">http://hdl.handle.net/10097/37453</a>

氏名	いし ばし きよ たか		
授与学位	石 橋 清 隆		
学位授与年月日	博士（工学）		
学位授与の根拠法規	平成19年3月27日		
研究科，専攻の名称	学位規則第4条第1項		
学位論文題目	東北大学大学院工学研究科（博士課程）電子工学専攻		
指導教員	RLSA プラズマ応用装置の高性能化技術に関する研究		
論文審査委員	指 導 教 員 東北大学教授 伊藤 隆司		
	主査 東北大学教授 伊藤 隆司	東北大学教授 坪内 和夫	
	東北大学教授 須川 成利	客員教授 大見 忠弘	
		(未来科学技術共同研究センター)	
	東北大学助教授 小谷 光司	客員助教授 平山 昌樹	
		(未来科学技術共同研究センター)	

## 論文内容要旨

あらまし

RLSA(Radial Line Slot Antenna)による高密度マイクロ波励起プラズマ源を用いたラジカル反応装置の高性能化技術に関する研究を行った。特に、幅広いプロセス条件で均一なプラズマを発生させることができる電磁界分布形成技術を研究した。また、プロセスガスを噴出する誘電体シャワー構造の信頼性を高めるとともに、ガスのダウンフロー形成条件を研究した。その結果、異なるガス種や圧力条件においても、常にプラズマやラジカルをウェハ上に均一に供給できる装置の設計手法を確立した。

### 1. 序論

多様化・高度化が進む半導体集積回路において、低コストで信頼性の高いデバイス製造技術の開発が不可欠である。薄膜堆積あるいは微細加工に用いるプラズマ装置においては、同一チャンバーで連続した処理が安定に実現できる技術、デバイスへのダメージリスクを伴う従来型のイオンベースプロセスから脱却したラジカルベースのプロセス技術、原料ガスの解離度制御技術の開発が重要な課題である。

東北大学ではこれらの技術課題に対する現状最適と考えられる装置として図1に示すようなマイクロ波励起高密度プラズマ応用装置の開発を進めている。図のように、本装置はマイクロ波電力

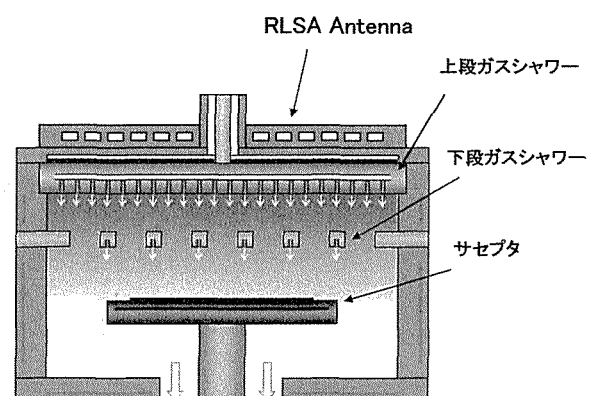


図1. マイクロ波励起高密度プラズマ応用装置

を供給する RLSA アンテナと、上下二段のガスシャワーを有し、上段ガスシャワーはマイクロ波透過用誘電体窓を兼ねている。

RLSA アンテナは、元々東京工業大学後藤教授によって衛生通信用として開発されたもので<sup>2)</sup>、プラズマ源用としては図2のようなスロットパターンを有する。アンテナ近傍でも均一な電磁界が形成できるため、誘電体窓直下で、均一なプラズマとラジカル生成が可能になる。

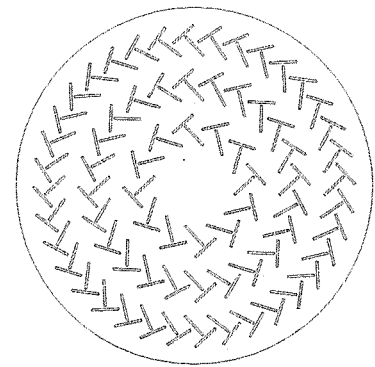


図2. RLSA スロット模式図

ガス供給に関しては、上段ガスシャワーからプラズマ生成ガス、下段ガスシャワーから原料ガスを流す。この構成は、原料ガスのプラズマ生成域への逆拡散抑制、チャンバーへの堆積抑制と原料ガス使用効率に優れており、環境・コスト面からも理想的な構成要素となっている。

本研究では、本装置に関し、幅広いプロセス条件で均一なプラズマを発生させる技術と、上段ガスシャワーの信頼性改善技術並びに理想的なダウンフローを形成するガス供給技術について研究を行った。

## 2. RLSA アンテナを用いたマイクロ波励起プラズマ源の設計技術

RLSA アンテナの実用化に向けた主要な技術課題は、誘電体窓内での伝播電磁波や定在波の生成を抑制してプラズマの安定性を改善することと、スロットパターンによるプラズマ分布の均一性調整をしやすいようにすることが課題である。本研究では、まず誘電体窓厚み調整による伝播電磁波の抑制技術を明らかにした。図4は、TM モードで伝播する電磁波の伝播定数  $k_z$  の誘電体窓厚み  $d$  依存性を示している。図中の  $k_d$  と  $\lambda_d$  は、それぞれ誘電体中を伝播する平面波の伝播定数と波長である。同図において、純表面波モードは、誘電体窓とプラズマの界面で最も電磁波のパワー密度が高くなるモードである。それ以外は、導波管で扱われるようなモードと本質的に同じである。同図から、誘電体窓厚みを  $\lambda_d/4$  程度にすれば、誘電体窓を伝播する電磁波は限定されることが判る。この厚みでは TE モードの電磁波は全て伝播しないことも示すことができた。

次に、誘電体窓に段差や隔壁を設けることにより、

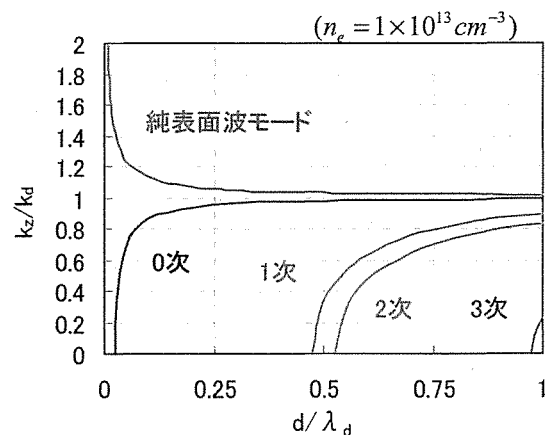


図3. 誘電体窓厚みと伝播電磁波解

電磁波の伝播領域をゾーン化する技術について研究した。一般に誘電体のインピーダンスはその厚みに概ね比例するため、急激に厚みが変わるところでは電磁波は一部反射されてゾーン化が生じる。さらに反射率を高めるために、図 4 に示されるような隔壁を用いたチョーク効果の研究を行った。市販電磁界解析ソフト HFSS を用いて、隔壁形状と反射率の相関を調べた。最終的には、隔壁側面を  $45^\circ$  テーパにすることにより、プラズマ密度の広い範囲に渡って高い反射率が確保できることが判った。

スロットパターンについては、スロット配置の回転対称性を、誘電体窓内で励起できる定在波のそれとずらせることにより、定在波抑制効果を高めた。

図 5 は、最適化した誘電体窓について、プラズマ安定性を実験的に評価した結果である。図のように一般に VSWR（定在波比率）が低く、プラズマ不安定を示すような、急激な曲線の変化点や不連続な部分がないので、極めて安定であると言える。

図 6 はプラズマ密度分布のプロセス条件依存性である。エッチングで用いられるガスを例とした。図のように、広いプロセス条件範囲に対してプラズマが均一に保たれている。

### 3. 上段ガスシャワーの設計技術

まず、上段ガスシャワーガス流路内での異常放電を抑制するために、図 7 のような多孔体を用いることと、流路内のガス圧を数 100Torr 以上にするのが有効であることを検証した。

次に、上段下段のガス流量配分を市販流れ解析ソフト Fluent を用いて検討した。図 8 に示すように、下段からのみ

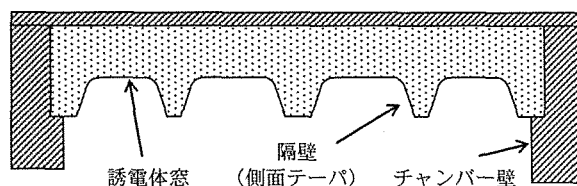


図 4. チョーク効果を応用した誘電体窓形状

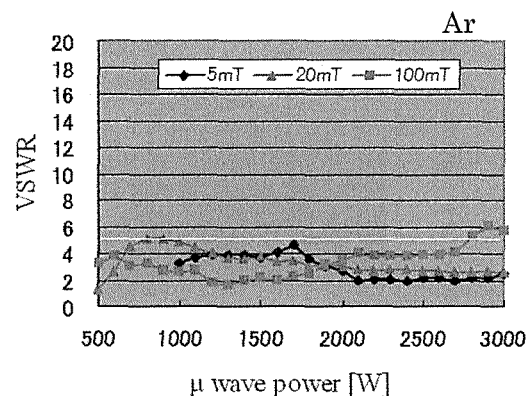


図 5. マイクロ波パワーと定在波比率

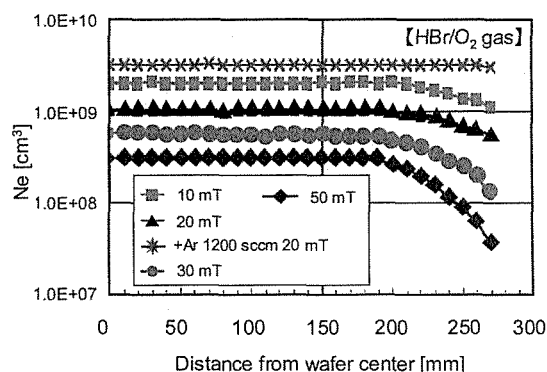


図 6. プラズマ密度分布の圧力依存性

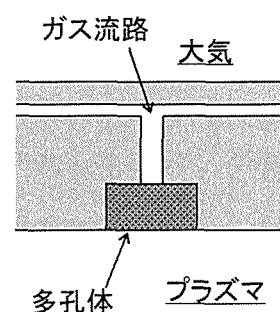
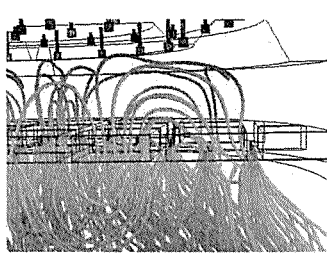


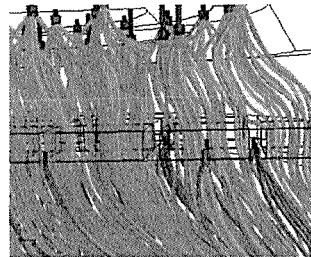
図 7. 上段ガスシャワーガス供給孔

ガスを流した場合には、上方への原料ガスの流線が生じ、チャンバー内部で原料ガスが攪拌されていることが判る。一方、上段から大量にガスを流すことで完全にダウンフローが形成できる。

上段ガスシャワー有無によるプラズマクリーニング後のチャンバー内部材の堆積物の様子を図9に示す。図のように、上段ガスシャワーを用いたときの効果が明らかである。歩留まりやスループットの観点からクリーニング特性が良いことは大きいメリットであり、本構成が理想的であることが証明された。

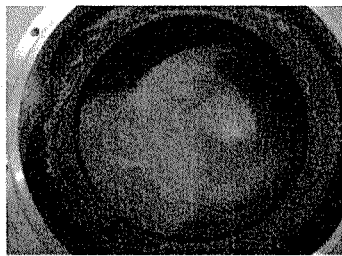


(a) 下段のみ

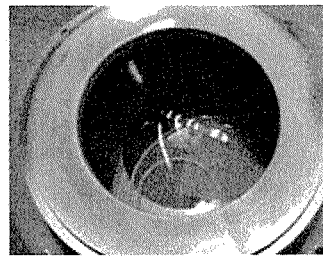


(b) 上段/下段=10:1

図8. 流線図



(a) 下段ガスシャワーのみの場合



(b) 上段ガスシャワーを用いた場合

図9. 上段ガスシャワーによるクリーニング特性

#### 4. 結論

幅広い圧力範囲で均一なプラズマを形成するために誘電体窓の厚みを $\lambda_d/4$ にすることや凹凸を形成することが有効であることを検証した。また、上段ガスシャワーでメインのダウンフローを形成することができることを検証するとともに、下段ガスシャワーから流した原料ガスやその解離物が必要以上に不必要な部分へ拡散せず、チャンバーのクリーニング特性が大幅に改善されることを実証した。

#### 参考文献

- 1) M. Hirayama and T. Ohmi: Proc. 30th Symp. ULSI Ultra Clean Technol. (1997) p51 .
- 2) N. Goto and M. Yamamoto, "Circularly Polarized Radial-line Slot Antennas," IECE Japan, Tech. Rep., AP80-57, Aug. 1980.

# 論文審査結果の要旨

多様化・高度化が進む半導体集積回路において、低コストで信頼性の高いデバイス製造技術の開発が不可欠である。薄膜堆積あるいは微細加工に用いるプラズマ装置においては、同一チャンバーで連続した処理が安定に実現できる技術の開発が重要な課題である。

著者は、RLSA(Radial Line Slot Antenna)による高密度マイクロ波励起プラズマ源を用いるラジカル反応装置の高性能化技術に関する研究を行った。均一なプラズマを発生させるRLSAの最適化設計を行い、プラズマの状態に依存しない励起用電磁界形成技術を確立した。また、プロセスガスを噴出する誘電体シャワー構造の信頼性を高めるとともに、ガスのダウンフロー形成条件を明確にした。本論文は、これらの研究成果をまとめたもので、全文6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、RLSAマイクロ波励起プラズマ源を用いるラジカル反応装置において、プラズマの安定性と均一性確保の要因を明示した。また、上下2段の誘電体ガスシャワーによるガスダウンフロー形成が反応ガスの過剰解離抑制とウェハ上へのプロセスガスの均一供給に必須であることを明らかにした。これらは、信頼性の高いプラズマ装置設計の基本コンセプトとして重要である。

第3章では、RLSAマイクロ波励起プラズマ源の安定化と均一性制御技術に関する研究を行った。プラズマ装置上部の誘電体窓を伝播する電磁波に関して理論的考察を行い、誘電体窓の形状と励起される伝播電磁波および定在波モードとの相関を明らかにした。また、RLSAのスロットパターンの回転対称性によって定在波を抑制する技術を開発した。これらのマイクロ波設計技術を用いることにより、高密度プラズマを安定に、かつプラズマの均一性がガス種や装置内圧力を変えても影響を受けないようにできることを実証した。本技術は、RLSAに限らずマイクロ波励起プラズマ源に一般的に応用できる技術であり、本技術を構築した意義は大きい。

第4章では、開発したプラズマ源を用いたプロセス技術について研究した。一般的な誘導結合励起型プラズマ源との特性比較を行いながら、RLSAを用いたプラズマ源の優位性について明らかにした。さらに、半導体デバイス製造で用いられるW/poly-Siゲート形成プロセスに適用することによって連続エッチングによる形状評価を行い、同一チャンバーで複数工程の一貫連続処理が可能であることを実証した。これらは、実用上、重要な成果である。

第5章では、開発した誘電体窓に上段ガスシャワーを組み込み、プロセスガスをウェハに垂直に供給するダウンフロー技術の研究を行った。さらに、上段と下段の2段ガスシャワー構造において、下段からの原料ガスを上方に拡散させずに均一にウェハへ供給する逆流防止技術を確立した。同時に、解離した原料ガスが上方の部材やチャンバー壁等に付着する問題も解消されることを実証した。誘電体窓内での異常放電抑制については、プラズマの進入防止と誘電体窓内ガス圧の最適化により解決できることを示した。これらは、信頼性の高いプラズマ装置の設計に極めて有用な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、プラズマを用いる半導体デバイス製造工程において、各々のプロセス条件によらずプラズマを均一に発生させ、信頼性の高い一貫処理を実現する技術を確立したものであり、半導体プロセス工学および電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。